

Ю. А. КРАШАНИЦА, К. В. ГУТОРОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»***МЕТОД ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ОБЪЕКТОВ
АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Представлено построение газодинамической модели физического процесса чистовой обработки деталей как произвольной пространственной формы, так и материала изготовления. На базе общих законов сохранения динамики вязкого теплопроводного газа получены аналитические формы решений для кинематических и динамических характеристик высокотемпературного потока на примере плоского канала, имитирующего поверхность очищаемой детали. Показано, что в плоском случае законы сохранения имеют линейную форму, что обеспечило точные решения для кинематических характеристик, таких как скорость и завихренность вязкого потока газа, играющих основную роль при вычислении динамических и тепловых характеристик потока. Принципиальное значение имеет применение обобщенного аппарата векторно-тензорного анализа с целью получения интегральных представлений решений дифференциальных форм законов сохранения импульса и энергии в контрольной области. Управление газодинамическими и термодинамическими параметрами потока способно обеспечить качественную поверхностную очистку деталей. Современный уровень технологического развития характеризуется постоянной сложностью выпускаемой продукции. Для его изготовления требуется обработка большого количества деталей сложной формы. Математическое моделирование является эффективным и экономичным способом решения многих технических задач. Существуют различные способы обеспечения необходимой чистоты деталей машин или снижения негативного воздействия технологических загрязнений. Существующие методы отделки и очистки деталей по физико-химическому воздействию на материал при обработке делятся на несколько групп. Наиболее распространенными являются как механические методы, в которых устранение дефектов осуществляется механическим воздействием на обрабатываемые детали инструмента, так и химические и механические методы, в которых одновременно происходит механическое воздействие инструмента и химическое воздействие на внешние поверхности. Газодинамический метод устранения дефектов, возникающих после предварительной металлообработки деталей авиационных объектов, представляется весьма эффективным.

Ключевые слова: *металлообработка; технологические дефекты деталей; физико-химические характеристики конструкционных материалов; законы сохранения; вязкая струя газа; кинематические и динамические характеристики; тепловое воздействие; чистота поверхности.*

Введение

Современный уровень развития техники характеризуется постоянным усложнением производимой продукции. Для ее производства требуется обрабатывать большое количество деталей сложной формы [1]. Математическое моделирование эффективный и экономичный путь решения многих технических задач [2].

Известны различные пути обеспечения необходимой чистоты деталей машин или снижения негативных влияний от технологических загрязнений. Существующие методы отделки и очистки деталей по физико-химическому воздействию на материал при обработке можно разделить на пять групп. Механические методы, при которых удаление дефектов осуществляется путем механического воздействия

на обрабатываемые детали твердых тел (инструментов). Химико-механические методы, при которых имеет место одновременное механическое воздействие инструмента и химическое воздействие внешней среды (жидкости). Химические методы, при которых удаление заусенцев осуществляется путем воздействия химически активной жидкой или газовой среды. Электрохимические методы, для которых характерно химическое воздействие жидкой среды и электрического тока, проходящего через электролит и материал детали. Физические методы осуществляют обработку путем воздействия на материал ультразвуковых волн, электрических разрядов, электрогидравлических ударов, тепловых импульсов и др. [3].

Топливные и гидравлические агрегаты летательных аппаратов имеют большое количество различных как по конструкции и назначению, так и по

пространственно-геометрической конфигурации золотниковых и плунжерных пар, высокоточных элементов авиационных конструкций, определяющих долговечность, безотказность и надежность агрегатов. Основным направлением решения проблем чистоты является разработка и исследование новых эффективных методов и средств очистки рабочих поверхностей полостей, рабочих и технологических жидкостей, в результате чего ресурс может быть увеличен в 2..3 раза. Поэтому представляется весьма перспективным применение высокоэнергетического газоструйного инструмента с целью достижения достаточной чистоты деталей и агрегатов. Необходимо также подчеркнуть, что в силу указанных выше конструктивных особенностей агрегатов авиакосмической техники механическая обработка либо затруднена, либо невозможна. Анализируя существующие исследования [4, 5] по минимизации или полному удалению ликвидов, дефектов на детали можно сказать, что требуемой чистоты не достигнуто, поэтому целью данной работы обоснование газодинамического метода обработки деталей.

1. Постановка задачи

Весьма эффективным представляется газодинамический метод удаления дефектов, имеющих место после предварительной металлообработки деталей объектов летательных аппаратов.

Математической моделью такого процесса является система законов сохранения динамики вязкого теплопроводного газа [1], записанная в произвольной системе криволинейных ортогональных координат (s_i, τ_i, n_i) (рис. 1).

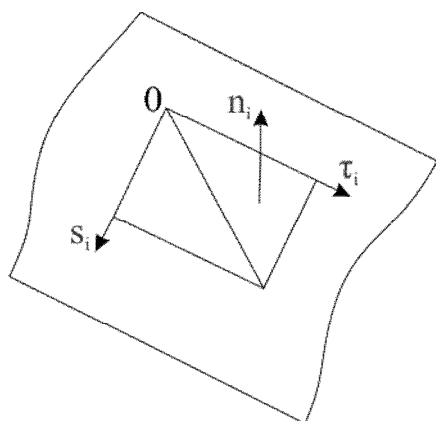


Рис. 1. Локальная система криволинейных ортогональных координат

Закон сохранения массы:

$$(\nabla, \rho \mathbf{V}) = (\nabla \rho, \mathbf{V}) + \rho (\nabla, \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

где $\nabla \rho = \frac{1}{H_s} \frac{\partial \rho}{\partial s} + \frac{1}{H_\tau} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{H_n} \frac{\partial \rho}{\partial n}$;

$$(\nabla, \mathbf{V}) = \frac{1}{H_s H_\tau H_n} \left(\frac{\partial (v_s H_\tau H_n)}{\partial s} + \frac{\partial (v_\tau H_s H_n)}{\partial \tau} + \frac{\partial (v_n H_s H_\tau)}{\partial n} \right).$$

Закон сохранения импульса:

$$(\rho \mathbf{V}, \nabla \mathbf{V}) + \nabla p - \frac{5}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \nabla (\nabla, \mathbf{V}) - \frac{\mu}{\text{Re}} \Delta \mathbf{V} = 0. \quad (2)$$

Закон сохранения энергии:

$$(\nabla, \{ (E+p) \mathbf{V} - (\mathbf{H}, \mathbf{V}) - \mathbf{T} \}) = 0, \quad (3)$$

где ρ – плотность среды; p – гидростатическое давление; $\mathbf{V}(v_s, v_\tau, v_n)$ – вектор скорости потока; H_i – коэффициенты Ламе; μ – коэффициент динамической вязкости; $\text{Re} = \frac{\rho_\infty V_\infty L}{\mu_\infty}$ – число Рейнольдса; а вектор потока тепла в рамках действия закона теплопроводности Фурье

$$\mathbf{T} = i t_x + j t_y + k t_z = k \nabla T, \quad (4)$$

где T – температура газа, а k – известный коэффициент теплопроводности. Выражение для внутренней энергии E , отнесенной к единице объема газа обычно известно из физики. Для совершенного газа, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, уравнением состояния которого является уравнение Клапейрона $p = \rho R T$, внутренняя энергия E зависит только от температуры, выражение для подсчета которой имеет вид:

$$E = \int_0^T C_v dT, \quad (5)$$

где C_v – теплоемкость при постоянном объеме.

Для одноатомного газа $C_v = \text{const.}$ и $E = \frac{3}{2} R T$.

Для случая двухатомного газа в определенном диапазоне температур ($T < 600 \dots 700 \text{ K}$), когда практически возбуждены только поступательные и вращательные энергии молекул, теплоемкость постоянна и $E = \frac{5}{2} R T$.

В общем случае компоненты тензора скоростей деформаций (см. (3))

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (6)$$

вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ &= 2 \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} (\nabla, \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{yy} &= \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ &= 2 \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} (\nabla, \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{zz} &= \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \\ &= 2 \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} (\nabla, \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \tau_{yx},$$

$$\tau_{xz} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \tau_{zx},$$

$$\tau_{yz} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \tau_{zy}. \quad (7)$$

В плоском случае $\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} \end{pmatrix}$ и:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \\ &= 2 \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} (\nabla, \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{yy} &= \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \\ &= 2 \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} (\nabla, \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \tau_{yx}, \quad (8)$$

$$\tau_{zz} = 0, \tau_{xz} = \tau_{zx} = 0, \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0.$$

2. Одномерные течения вязкого газа в плоском канале

2.1. Определение скорости вязкого потока

В этом случае коэффициенты Ламе $H_i = 1$ и уравнение сохранения массы (1) имеет вид: $\nabla \rho = 0$, так как $\mathbf{V} = iu(y)$ (рис. 2) и $(\nabla, \mathbf{V}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$.

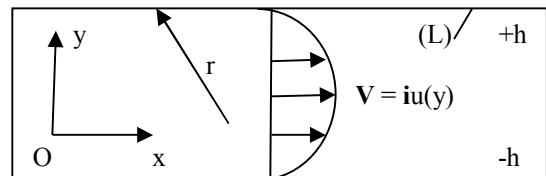


Рис. 2. Поток вязкого газа в плоском канале

Поэтому в этом случае поток вязкого газа можно считать несжимаемым – $\rho = \text{const}$.

Закон сохранения импульса (2), в силу предыдущего, также существенно упрощается, так как, во-первых

$$(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} = u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} = 0,$$

а во-вторых,

$$\Delta \mathbf{V} = \nabla (\nabla, \mathbf{V}) - [\nabla, [\nabla, \mathbf{V}]] = -[\nabla, \mathbf{\Omega}],$$

поэтому закон сохранения импульса (2) имеет вид линейного векторно-дифференциального уравнения в частных производных:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\text{Re}} [\nabla, \mathbf{\Omega}], \quad (9)$$

где $\mathbf{\Omega} = -\mathbf{k} \frac{\partial u}{\partial y}$ – вектор завихренности.

Таким образом:

$$\mathbf{i} \frac{\partial p}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial p}{\partial y} = \mathbf{i} \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \text{const}.$$

Общее решение этого простейшего уравнения имеет вид:

$$u = \frac{\text{Re}}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1 y + C_2, \quad (11)$$

а произвольные постоянные определяются обусловленными граничными условиями неподвижности границ канала (см. рис. 2):

$$u|_{-h} = u|_{+h} = 0. \quad (12)$$

Тогда:

$$\begin{cases} \frac{Re}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 - C_1 h + C_2 = 0; \\ \frac{Re}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2 + C_1 h + C_2 = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_1 = 0, \\ C_2 = -\frac{Re}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^2. \end{cases} \quad (13)$$

и выражение для скорости потока принимает вид:

$$u = \frac{Re}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y^2 - h^2). \quad (14)$$

Расход жидкости через сечение между пластинами при толщине слоя вдоль оси z, равной единице:

$$\begin{aligned} Q &= \iint_{(S)} u dS = \frac{Re}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^1 dz \int_{-h}^{+h} (y^2 - h^2) dy = \\ &= -\frac{2Re}{3\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^3. \end{aligned} \quad (15)$$

2.2. Вычисление характеристик вязкого потока газа в плоском канале

Учитывая, что в уравнении (9) коэффициент динамической вязкости ν и число Re постоянные величины, а, по определению,

$$(\nabla, [\nabla, \Omega]) \equiv 0, \quad (\nabla, \nabla p) = \Delta p, \quad [\nabla, \nabla p] \equiv 0,$$

имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta p = 0; \\ [\nabla, [\nabla, \Omega]] = 0, \end{cases} \quad (16)$$

где $\nabla \equiv \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}$ – векторно-дифференциальный

оператор, $\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – дифференциальный

оператор Лапласа, $\Omega = [\nabla, \mathbf{V}] = \mathbf{k} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ – ротор вектора.

Ротор ротора вычисляется по формуле:

$$[\nabla, \Omega] \equiv \mathbf{i} \frac{\partial \Omega_z}{\partial y} - \mathbf{j} \frac{\partial \Omega_z}{\partial x}. \quad (17)$$

В силу основной теоремы векторного анализа [6]:

$$[\nabla, [\nabla, \Omega]] = \nabla(\nabla, \Omega) - \Delta \Omega, \quad (18)$$

и консервативности вектора завихренности, вместо (16), имеем краевую задачу:

$$\begin{cases} \Delta p = 0; \\ \Delta \Omega = 0 \end{cases} \quad (19)$$

при тех же граничных условиях (11).

Известно [7], что как скалярное, так и векторное уравнения Лапласа в (19) имеют интегральные представления решений:

$$\begin{aligned} p &= \oint_{(L)} \left(\varphi \frac{\partial p}{\partial n} - p \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl; \quad \Omega = \\ &= \oint_{(L)} \left(\varphi \frac{\partial \Omega}{\partial n} - \Omega \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\varphi = \frac{1}{2\pi} \ln r$ – фундаментальное решение уравнения Лапласа в плоском случае, r – расстояние между внутренней точкой области течения и точкой интегрирования, расположенной на границе области (L).

В интегральных представлениях целесообразно выполнить интегрирование по частям. Действительно, из выражения (9), следует, что $\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\mu}{Re} (\mathbf{n}, [\nabla, \Omega])$, поэтому, воспользовавшись теоремой Стокса [7], получаем

$$\begin{aligned} p &= -\oint_{(L)} \left(\frac{\mu}{Re} \varphi (\mathbf{n}, [\nabla, \Omega]) + p \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl = \\ &= \oint_{(L)} \left(\frac{\mu}{Re} ([\mathbf{n}, \nabla \varphi], \Omega) - p \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl. \end{aligned} \quad (21)$$

В случае вектора завихренности Ω в интегральном представлении (20) необходимо выполнить следующие преобразования [8], с учетом того, что $(\nabla, \Omega) = 0$, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial n} &= \left(\mathbf{n}, (\nabla \Omega - \nabla^* \Omega) \right) + \left(\mathbf{n}, (\nabla^* \Omega - \mathbf{I}(\nabla, \Omega)) \right) = \\ &= -\frac{Re}{\mu} [\mathbf{n}, \nabla p] + (\mathbf{n}, [\nabla, \mathbf{I}, \Omega]). \end{aligned}$$

Тогда из (19) имеем:

$$\begin{aligned}\Omega &= \oint_{(L)} \left(\varphi \frac{\partial \Omega}{\partial n} - \Omega \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl = \\ &= \oint_{(L)} \left(\varphi (\mathbf{n}, [\nabla, [\mathbf{I}, \Omega]]) - \frac{\text{Re}}{\mu} \varphi [\mathbf{n}, \nabla p] - \Omega \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl = \\ &= \oint_{(L)} \left(\frac{\text{Re}}{\mu} p [\mathbf{n}, \nabla \varphi] - [[\mathbf{n}, \nabla \varphi], \Omega] - \Omega \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl.\end{aligned}$$

Таким образом, для определения скалярного давления p и вектора завихренности Ω получена система интегральных представлений решений:

$$p = \oint_{(L)} \left(\frac{\mu}{\text{Re}} ([\mathbf{n}, \nabla \varphi], \Omega) - p \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl; \quad (22)$$

$$\Omega = \oint_{(L)} \left(\frac{\text{Re}}{\mu} p [\mathbf{n}, \nabla \varphi] - [[\mathbf{n}, \nabla \varphi], \Omega] - \Omega \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl. \quad (23)$$

Здесь ядра подынтегральных выражений:

$\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ – классический потенциал двойного слоя [7],
 $[\mathbf{n}, \nabla \varphi]$ – непрерывная касательная производная потенциала простого слоя φ .

Искомое значение $\frac{\partial p}{\partial x}$ в (14) определяется с помощью представления (22).

Определение термодинамических характеристик потока связано с законом сохранения энергии (3):

$$((\nabla E + \nabla p), \mathbf{V}) + (E + p)(\nabla, \mathbf{V}) - (\nabla, (\mathbf{\Pi}, \mathbf{V})) - k\Delta T = 0.$$

Здесь $(\nabla, \mathbf{V}) = 0$ и $\mathbf{\Pi} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\mathbf{i}\mathbf{j} \frac{\partial u}{\partial y} + \mathbf{j}\mathbf{i} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$, см. (5), (7).

Тогда с учётом того, что

$$\mathbf{V} = iu(y), (\nabla, \mathbf{V}) = 0, (\mathbf{\Pi}, \mathbf{V}) = \mathbf{j} \frac{1}{2} \frac{\partial u^2}{\partial y}$$

$$\text{и } (\nabla, (\mathbf{\Pi}, \mathbf{V})) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u^2}{\partial y^2} = \frac{\text{Re}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x},$$

уравнение энергии в данном случае принимает вид:

$$(\nabla(E + p), \mathbf{V}) - \frac{\text{Re}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} - k\Delta T = 0. \quad (24)$$

Уравнение (24) является уравнением Пуассона относительно температуры T , интегральное представление которого имеет вид [5]:

$$\begin{aligned}T &= \frac{1}{k} \iint_{(\Sigma)} \{ (\nabla(E + p), \mathbf{V}) + (\nabla, (\mathbf{\Pi}, \mathbf{V})) \} \varphi d\sigma + \\ &+ \oint_{(L)} \left(\varphi \frac{\partial T}{\partial n} - T \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl = \\ &= \frac{1}{k} \iint_{(\Sigma)} (\nabla, \{ ((E + p)\mathbf{V}) + (\mathbf{\Pi}, \mathbf{V}) \}) \varphi d\sigma + \\ &+ \oint_{(L)} \left(\varphi \frac{\partial T}{\partial n} - T \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dl = \\ &= \iint_{(\Sigma)} (E + p)(\mathbf{V}, \nabla \varphi) d\sigma - \frac{\text{Re}}{\mu} \iint_{(\Sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} \varphi d\sigma + \\ &+ \oint_{(L)} \left\{ \left(\varphi \frac{\partial T}{\partial n} - T \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) - (E + p) \mathbf{V}_n \varphi \right\} dl,\end{aligned} \quad (25)$$

где искомой является температура T , а остальные параметры определены представлениями (22), (23).

Здесь может быть две постановки задачи: известна температура T_L на границах, или задан тепловой поток $\frac{\partial T}{\partial n}$ через границы.

Предельный переход в интегральных представлениях (22), (23), (25) к точкам на границах контрольной области (Σ) приводит к эквивалентной, поставленной задаче системе линейных граничных интегральных уравнений [8], подлежащих последующей численной реализации.

Заключение

Представленная математическая модель высокотемпературного газового потока предназначена для практической реализации в процессе окончательной технологической очистки деталей. Результаты могут быть использованы для эффективной очистки широкого спектра деталей объектов летательных аппаратов наиболее применяемых конфигураций за счет выбора вариантов рабочего газа или их смесей с соответствующими физико-химическими характеристиками. Кроме этого, представленная методология позволяет расширить спектр таких задач в случаях применения электро-, магнитодинамических воздействий.

Литература

1. Белянин, П. Н. Промышленная чистота машин [текст] / П. Н. Белянин, В. М. Данилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
2. Гузеев, В. И. Математическое моделирование технологических процессов и производств: учебное пособие [текст] / В. И. Гузеев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 102 с.

3. Жданов, А. А. Обзор достижений в области термоимпульсных и термохимических отделочно-очистных технологий [текст] / А. А. Жданов, А. В. Лосев // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 37 (2). – X., 2004. – С. 109 - 118.

4. Regnier, T. Experimental investigation and modelling of burr formation during orthogonal cutting of A356+0,5Cu aluminium alloy [Text] / T. Regnier, G. Fromentin, J. Outeiro. // XIII International Conference on High Speed Machining (HSM), 2016. – P. 6.

5. Finite element modeling of burr formation in metal cutting [Electronic resource] / S. Min, D. A. Dornfeld, J. Kim, B. Shyu. – University of California, Berkeley, CA, U.S.A., 2007. – 7 p. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/6f30942c> (accessed 27-06-2007).

6. Fletcher, C. A. J. Computational Techniques for Fluid Dynamics P. 2. Specific Techniques for Different Flow Categories [Text] / C. A. J. Fletcher. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987. – 552 p.

7. Кочин, Н. Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления [Текст] / Н. Е. Кочин. – М. : АН СССР, 1961. – 426 с.

8. Крашаница, Ю. А. Векторно-тензорный анализ, теория потенциала и метод граничных интегральных уравнений в начально-краевых задачах аэродинамики [Текст] / Ю. А. Крашаница. – К. : Наук. думка, 2016. – 225 с.

9. Karaguzel, U. Mechanical and thermal modeling of orthogonal turn-milling operation [Text] / U. Karaguzel. – Procedia CIRP 58, 2017. – 287 p.

modeling of technological processes and production]. Uchebnoe posobie. Chelyabinsk, Izdat. Centr UUrNU, 2015. 102 p.

3. Zdanov, A. A., Losev, A. V. Obzor dostizeniy v oblasti termoimpul'snih i termohimicheskikh otdelochno-ochistnih tehnologiy [Review of the achievements in the field of thermo-pulse and thermochemical finishing-cleaning technologies]. Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatel'nykh apparatov: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «KhAI» [Air-craft structures design and production questions: Sci. Proc. Coll. Zhukovsky National Aerospace University «KhAI»]. Kharkiv, «KhAI» Publ., 2004, no. 2, vol. 37, pp. 109-118.

4. Regnier, T., Fromentin, J., Outeiro, G. Experimental investigation and modelling of burr formation during orthogonal cutting of A356+0,5Cu aluminium alloy, XIII International Conference on High Speed Machining (HSM), 2016, pp. 6.

5. Min, S., Dornfeld, D. A., Kim, J., Shyu, B. Finite element modeling of burr formation in metal cutting, University of California, Berkeley, CA, U.S.A., 2007. 7 p. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/6f30942c> (accessed 27-06-2007).

6. Fletcher, C. A. J. Computational Techniques for Fluid Dynamics P. 2. Specific Techniques for Different Flow Categories, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987. 552 p.

7. Cochin, N. E. Vektornoe ischislenie i nachala tenzornogo ischisleniya [Vector calculus and beginnings of tensor calculus]. Moscow, AS USSR Publ., 1961. 426 p.

8. Krashanitsa, Yu. A. Vektorno-tenzornyi analiz, teoriya potentsiala i metod granichnykh integral'nykh uravnenii v nachal'no-kraevykh zadachakh aerogidrodinamiki [Vector and tensor analysis, potential theory and the method of boundary integral equations in the initial-boundary value problems of aero hydrodynamics]. Kiev, «Naukova dumka» Publ., 2016. 273 p.

9. Karaguzel, U. Mechanical and thermal modeling of orthogonal turn-milling operation, Procedia CIRP 58, 2017. 287 p.

References

1. Belyanin, P. N., Danilov V. M. Promishlennaya chistota mashin [Industrial purity machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 224 p.

2. Guzeev, V. I. Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh procesov i proizvodstv [Mathematical

Поступила в редакцию 17.01.2019, рассмотрена на редколлегии 14.02.2019

МЕТОД ГАЗОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Ю. О. Крашаниця, К. В. Гупорова

Представлено побудову газодинамічної моделі фізичного процесу чистової обробки деталей як задовільної просторової форми, так й матеріалу виготовлення. На базі загальних законів збереження динаміки в'язкого теплопровідного газу одержані аналітичні форми розв'язків для кінематичних та динамічних характеристик високотемпературного потоку на прикладі плоского каналу, який імітує поверхню деталі, що обробляється. Показано, що в плоскому випадку закони збереження мають лінійну форму, яка забезпечує наявність точних розв'язків щодо кінематичних характеристик, таких як швидкість та завихорність в'язкого потоку газу, які відіграють основну роль при обчисленні динамічних і теплових характеристик. Принципове значення має використання узагальненого апарату векторно-тензорного аналізу з метою одержання інтегральних представлень розв'язків диференціальних форм законів збереження імпульсу та енергії в контрольній області. Керування газодинамічними і термодинамічними параметрами потоку спроможне забезпечити якісну поверхневу очистку деталей. Сучасний рівень технологічного розвитку характеризується постійною

складністю продукції, що випускається. Для його виготовлення потрібно обробка великої кількості деталей складної форми. Математичне моделювання є ефективним і економічним способом вирішення багатьох технічних завдань. Існують різні способи забезпечення необхідної чистоти деталей машин або зниження негативного впливу технологічних забруднень. Існуючі методи обробки та очищення деталей по фізико-хімічному впливу на матеріал при обробці діляться на кілька груп. Найбільш поширеними є як механічні методи, в яких усунення дефектів здійснюється шляхом механічного впливу на оброблювані деталі інструменту, так і хімічні і механічні методи, в яких одночасно відбувається механічний вплив інструменту і хімічний вплив на зовнішні поверхні. Газодинамічний метод усунення дефектів, що виникають після попередньої металообробки деталей авіаційних об'єктів, є досить ефективним

Ключеві слова: металообробка; технологічні дефекти деталей; фізико-хімічні характеристики конструкційних матеріалів; закони збереження; в'язка струмина газу; кінематичні та динамічні характеристики; теплова взаємодія; чистота поверхні.

METHOD OF GAS DYNAMIC TREATMENT OF DETAILS OF OBJECTS AVIACOSMIC TECHNOLOGY

Y. A. Krashanytsya, K. V. Gutorova

The current level of technological development is characterized by the constant complexity of the products. For its production requires processing a large number of parts of complex shape. Mathematical modeling is an effective and economical way to solve many technical problems. There are various ways to ensure the necessary cleanliness of machine parts or reduce the negative effects of technological pollution. Existing methods of finishing and cleaning parts on the physical-chemical effects on the material during processing are divided into several groups. The most widespread are both mechanical methods in which the removal of defects is carried out by mechanical action on machined parts of tools and chemical and mechanical methods in which there is a simultaneous mechanical effect of the tool and the chemical action of the external. The gas-dynamic method of removing defects that occur after the preliminary metalworking of parts of aircraft objects seems to be very effective. The mathematical model of this process is the system of laws for the conservation of the dynamics of a viscous heat-conducting gas, the physicochemical characteristics of which are established in an experimental way. The construction of a gas-dynamic model of the physical process of finishing parts as an arbitrary spatial form and the material of manufacture is presented. On the basis of the general laws of conservation of the dynamics of a viscous heat-conducting gas, analytical forms of solutions for the kinematic and dynamic characteristics of a high-temperature flow are obtained using the example of a flat channel simulating the surface of a part being cleaned. It is shown that in the flat case the conservation laws have a linear form, which provided exact solutions for the kinematic characteristics, such as the velocity and vorticity of a viscous gas flow, which play a major role in calculating the dynamic and thermal characteristics of the flow. The use of a generalized apparatus of vector-tensor analysis is fundamentally important in order to obtain integral representations of the solutions of differential forms of the laws of conservation of momentum and energy in the control region. Control of gas dynamic and thermodynamic parameters of the flow is able to provide a high-quality surface.

Keywords: metalworking; technological defects of parts; physical-chemical characteristics of structural materials; conservation laws; viscous gas jet; kinematic and dynamic characteristics; thermal effects; surface cleanliness.

Крашаница Юрий Александрович – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры аэрогидродинамики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Гуторова Кристина Владимировна – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Krashanitsa Yuri Alexandrovich – doctor of sciences., Professor of the Department of Aerohydrodynamics, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: u.krashanitsa@khai.edu.

Hutorova Kristina Vladimirovna – PhD Student the Department of Aircraft production technology, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: k.gutorova61@gmail.com, Orcid Author ID: 0000-0002-9544-1778, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=ec5odL4AAAAJ>.